

## **English translation of DE 199 28 698 A1**

### **Apparatus for Making PIV Measurements**

An apparatus (1) for making Particle Image Velocimetry (PIV) measurements comprises a light source (2), light sheet optics (4) connected downstream of said light source for illuminating a light sheet (5) with light coming from said light source (2) and at least one camera (8) for multiple imaging of particles moving in said light sheet (5). A position-variable carrier (9, 10) for carrying the light source (2), the light sheet optics (4) and each camera (8) in a defined relative arrangement is provided thereby, said relative arrangement being maintained when the position of the carrier (9, 10) is varied.



①9 **BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT**

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 199 28 698 A 1**

⑤① Int. Cl. 7:  
**G 01 P 5/00**  
G 01 M 9/08  
G 01 N 21/53

⑳ Aktenzeichen: 199 28 698.1  
㉔ Anmeldetag: 23. 6. 1999  
㉕ Offenlegungstag: 21. 9. 2000

DE 199 28 698 A 1

Mit Einverständnis des Anmelders offengelegte Anmeldung gemäß § 31 Abs. 2 Ziffer 1 PatG

㉑ **Anmelder:**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt eV,  
53175 Bonn, DE

㉒ **Vertreter:**  
Rehberg und Kollegen, 37085 Göttingen

㉓ **Erfinder:**  
Raffel, Markus, 37075 Göttingen, DE; Dieterle, Lutz,  
37083 Göttingen, DE; Dewhirst, Tim, 37075  
Göttingen, DE; Kompenhans, Jürgen, 37130  
Gleichen, DE

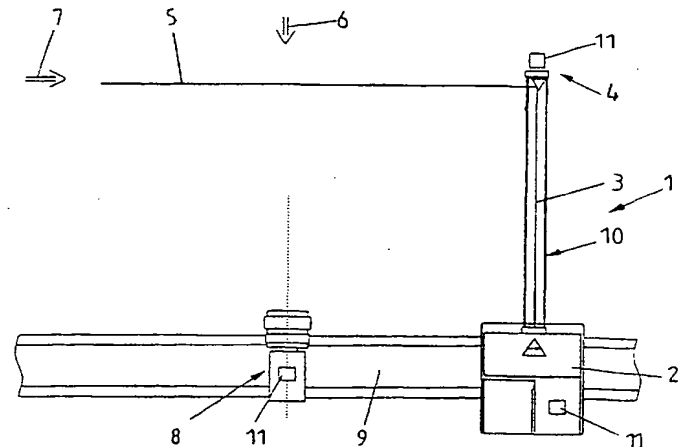
⑤⑥ **Entgegenhaltungen:**  
DE 43 21 876 C1  
DE 42 37 440 C1  
DE 197 37 933 A1

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ **Vorrichtung zur Durchführung von PIV-Messungen**

⑤⑦ Eine Vorrichtung (1) zur Durchführung von Particle-Image-Velocimetry-(PIV)-Messungen weist eine Lichtquelle (2), eine der Lichtquelle (2) nachgeschaltete Lichtschnittoptik (4) zur Ausleuchtung eines Lichtschnitts (5) mit von der Lichtquelle (2) kommendem Licht und mindestens eine Kamera (8) zur mehrfachen Abbildung von sich in dem Lichtschnitt (5) bewegendem Teilchen auf. Dabei ist ein positionsveränderbarer Träger (9, 10) vorgesehen, an dem die Lichtquelle (2), die Lichtschnittoptik (4) und jede Kamera (8) in definierter Relativanordnung gelagert sind, wobei die Relativanordnung bei Positionsveränderungen des Trägers (9, 10) erhalten bleibt.



DE 199 28 698 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung zur Durchführung von Particle-Image-Velocimetry-(PIV)-Messungen, mit einer Lichtquelle, mit einer der Lichtquelle nachgeschalteten Lichtschnittoptik zur Ausleuchtung eines Lichtschnitts mit von der Lichtquelle kommendem Licht und mit mindestens einer Kamera zur mehrfachen Abbildung hintereinander von sich in dem Lichtschnitt bewegenden Teilchen.

Die Durchführung von PIV-Messungen ist in allen auch hier wesentlichen grundsätzlichen Aspekten bekannt und beispielsweise in Raffel, M. et al.: "Particle-Image-Velocimetry"; Springer Verlag; ISBN: 3-540-63683-8 beschrieben.

Die Installation der einzelnen Komponenten einer Vorrichtung zur Durchführung von PIV-Messungen ist sehr aufwendig. Hierzu gehört auch eine Kalibrierung der Vorrichtung, die die genaue Relativlage der einzelnen Komponenten berücksichtigt. Dadurch fallen in den aerodynamischen Versuchseinrichtungen, wie insbesondere Windkanälen, in denen PIV-Messungen typischerweise durchgeführt werden, relativ lange Belegungszeiten an. Die Belegungszeiten bestimmen damit wesentlich den Kostenaufwand für PIV-Messungen, der beispielsweise in großen industriell genutzten Windkanälen wie dem DNW (Deutsch-Niederländischen-Windkanal) ca. 70.000,00 DM pro Messung beträgt.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Vorrichtung der eingangs beschriebenen Art aufzuzeigen, mit deren Hilfe PIV-Messungen binnen kürzerer Belegungszeiten von aerodynamischen Versuchseinrichtungen durchgeführt werden können.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe dadurch gelöst, daß ein positionsveränderbarer Träger vorgesehen ist, an dem die Lichtquelle, die Lichtschnittoptik und jede Kamera in definierter Relativanordnung gelagert sind, wobei die Relativanordnung bei Positionsveränderungen des Trägers erhalten bleibt. Das heißt, bei der Verwendung der neuen Vorrichtung ist nur der Träger in die Position zu bringen, in der der Lichtschnitt die interessierenden Teile einer Strömung erfaßt. Relative Ausrichtungen der einzelnen Komponenten der Vorrichtung zueinander sind nicht erforderlich. Ebenso entfällt die Notwendigkeit für eine Kalibrierung der Vorrichtung. Auf diese Weise können die Belegungszeiten von aerodynamischen Versuchseinrichtungen extrem verkürzt werden.

Dies gilt ganz besonders, wenn die neue Vorrichtung aus kompakten Einzelkomponenten zusammengesetzt ist, beispielsweise unter Verwendung von Minipulslasern als Lichtquelle und von kleinformatigen Videokameras als Kameras, so daß die gesamte Vorrichtung derart begrenzte räumliche Abmessungen aufweist, daß sie beispielsweise mit einem herkömmlichen Sondenverschiebegerät, welches für andere Verwendungszwecke in den meisten aerodynamischen Versuchseinrichtungen vorhanden ist, positioniert werden kann. Damit ist es möglich, binnen kurzer Zeit größere Meßvolumina mit dem Lichtschnitt abzuscannen.

In der bevorzugten Ausführungsform ist bei der neuen Vorrichtung eine Positionsmeßeinrichtung vorgesehen, um die jeweilige Position des Trägers bzw. der daran angeordneten Komponenten der Vorrichtung gegenüber einem ortsfesten Bezugssystem zu messen. Aus der Position des Trägers bzw. der Komponenten der Vorrichtung ist die jeweilige Lage des von jeder Kamera beobachteten Teils des Lichtschnitts im Raum ermittelbar, so daß die aufgenommenen PIV-Bilder und die daraus ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten diesen Raumlagen direkt zugeordnet werden können.

Die Positionsmeßeinrichtung weist typischerweise drei untereinander beabstandete und nicht auf einer Geraden liegende Ortssensoren an dem Träger auf, deren linearer Abstand zu drei ortsfesten Punkten, die ebenfalls nicht auf einer Geraden liegen, bestimmt wird. Dabei können die Ortssensoren an dem Träger Ultraschallsender sein, wobei in den drei ortsfesten Punkten Ultraschallempfänger angeordnet sind und wobei die Laufzeit der Ultraschallsignale zwischen den Sendern und den Empfängern als Maß für deren linearen Abstand bestimmt wird. Verwendbar sind auch entsprechende Mikrowellensender und -empfänger, Lichtquellen und -sensoren oder dgl. Der Träger der neuen Vorrichtung ist vorzugsweise im Raum nicht nur linear verschiebbar sondern auch verschwenkbar, um mit dem Lichtschnitt auch noch solche Meßvolumina zu erreichen, die sonst beispielsweise aufgrund eines Modells im Windkanal nicht zugänglich sind.

In der bevorzugten Ausführungsform weist der Träger der neuen Vorrichtung einen Hauptbalken auf, an dem die Lichtquelle und jede Kamera gelagert ist. Dieser Hauptbalken ist typischerweise besonders verwindungssteif ausgeführt.

Senkrecht an den Hauptbalken kann ein Querbalken angesetzt sein, an dessen freien Ende das ausgangsseitige Bauteil der Lichtschnittoptik angeordnet ist. Damit ist es möglich, den Lichtschnitt parallel zu dem Hauptbalken auszurichten, auf dem jede Kamera der neuen Vorrichtung angeordnet ist. Dabei ragt in den Bereich der Strömung nur der relativ gesehen klein dimensionierte Querbalken hinein, der zudem stromab bzw. seitlich des interessierenden Meßvolumens angeordnet werden kann. Außerdem ist es möglich, das ausgangsseitige Bauteil der Lichtschnittoptik mit einer aerodynamisch wirksamen Verkleidung zu versehen, um seinen Einfluß auf die interessierende Strömung grundsätzlich zu reduzieren.

In einer besonders bevorzugten Ausführungsform der neuen Vorrichtung ist das ausgangsseitige Bauteil der Lichtschnittoptik eine verspiegelte Kegelmantelfläche. Wenn auf eine solche verspiegelte Kegelmantelfläche ein Laserstrahl so gerichtet wird, daß er senkrecht zu der Symmetrieachse der Kegelmantelfläche reflektiert wird, entsteht aus dem Laserstrahl direkt der gewünschte Lichtschnitt. Dabei kann der Öffnungswinkel der seitlichen Ränder des Lichtschnitts durch Verändern des Auftreffpunkts des Laserstrahls auf die Kegelmantelfläche variiert werden. Je näher der Auftreffpunkt zur Kegelspitze verschoben wird, desto größer ist der Öffnungswinkel.

Vorzugsweise weist die Kegelmantelfläche ihrerseits einen Öffnungswinkel von 90° auf, wobei ihre Symmetrieachse parallel zu dem einfallenden Laserstrahl ausgerichtet ist. Wenn dann die Kegelmantelfläche in Richtung ihrer (geraden) Mantellinie, auf der der Auftreffpunkt des Laserstrahls liegt, parallelverschoben wird, kann der Laserstrahl näher an die Kegelspitze herangebracht oder von dieser entfernt werden, um den Öffnungswinkel der Ränder des Lichtschnitts nach Bedarf einzustellen, ohne daß bei einer präzisen Grundjustierung der Kegelmantelfläche und der ihr zugeordneten Verschiebeeinrichtungen danach eine neuerliche Kalibrierung der Vorrichtung zur Durchführung von PIV-Messungen erforderlich ist. Vielmehr wird durch die Verschiebung nur der von dem Lichtschnitt erfaßte Bereich eingeschränkt bzw. erweitert.

Die neue Vorrichtung kann auch zur Durchführung von Stereo-PIV-Messungen vorgesehen sein. Hierzu weist sie mindestens zwei Kameras auf, die die sich in dem Lichtschnitt bewegenden Teilchen aus unterschiedlichen Blickrichtungen abbilden. Zur vereinfachten Auswertung weisen dabei die Blickrichtungen vorzugsweise jeweils einen gleichgroßen Blickwinkel zur Haupterstreckungsebene des

Lichtschnitts auf.

Die Erfindung wird im folgenden anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert und beschrieben. Dabei zeigt Fig. 1 eine erste Ausführungsform der neuen Vorrichtung zur Durchführung von PIV-Messungen in einer Ansicht von oben.

Fig. 2 die Vorrichtung gemäß Fig. 1 in einer Seitenansicht.

Fig. 3 ein Detail der Vorrichtung gemäß Fig. 1.

Fig. 4 eine zweite Ausführungsform der neuen Vorrichtung in einer Ansicht von oben.

Fig. 5 eine dritte Ausführungsform der neuen Vorrichtung in einer Ansicht von oben und

Fig. 6 eine Seitenansicht der Vorrichtung gemäß Fig. 5.

Die in Fig. 1 dargestellte Vorrichtung 1 dient zur Durchführung von PIV-Messungen. Die Vorrichtung 1 weist eine Lichtquelle 2 auf, bei der es sich hier um einen Puls laser mit zwei Oszillatoren handelt, der einen gepulsten Laserstrahl 3 abgibt. Der Laserstrahl 3 trifft auf eine Lichtschnittoptik 4, die im Zusammenhang mit Fig. 3 näher erläutert werden wird. Die Lichtschnittoptik 4 formt aus dem Laserstrahl 3 einen Lichtschnitt 5. Die sich in dem Lichtschnitt 5 befindlichen Teilchen, die von einer sich im wesentlichen in Richtung eines Pfeils 6 oder eines Pfeils 7 bewegenden Strömung mitgeführt werden, werden von einer Kamera 8 abgebildet. Dabei bildet die Kamera 8 die Teilchen mindestens zweifach hintereinander ab. Diese mehrfache Abbildung kann dadurch bewirkt werden, daß der Lichtschnitt 5 zweifach hintereinander ausgeleuchtet wird oder daß die Kamera 8 einen Verschuß aufweist, der zweimal hintereinander geöffnet wird. Bei der vorliegenden Ausführungsform mit den zwei Oszillatoren der Lichtquelle 2 wird der Lichtschnitt 5 zweifach hintereinander ausgeleuchtet. Die Lichtquelle 2 und die Kamera 8 sind an einen Hauptbalken 8 gelagert, der verwindungssteif ausgeführt ist. An den Hauptbalken 9 ist im Bereich der Lichtquelle 2 ein Querbalken 10 senkrecht angesetzt, der an seinem freien Ende die Lichtschnittoptik 4 trägt. Der Lichtschnitt 5 erstreckt sich wiederum senkrecht zu dem Querbalken 10 und dabei parallel zu dem Hauptbalken 8.

Aus Fig. 2 geht der Querschnitt des Hauptbalkens 9 hervor und, daß die Lichtquelle 2, an der der Querbalken 10 befestigt ist, auf den Hauptbalken 9 aufgeklemmt ist. Ebenso ist auch die Kamera 8 auf den Hauptbalken 9 aufgeklemmt. Die Kamera 8 ist mit ihrer Abbildungsrichtung senkrecht zu dem Lichtschnitt 5 ausgerichtet.

Die Relativanordnung aller Komponenten der Vorrichtung 1 ist durch den Hauptbalken 9 und den Querbalken 10 genau definiert und fest. Eine Kalibrierung der Vorrichtung 1 ist daher nur einmalig nötig. Danach kann der Träger aus dem Hauptbalken 9 und dem Querbalken 10 beliebig im Raum positioniert werden und dort können sofort PIV-Messungen durchgeführt werden. Zur Bestimmung der Position des Trägers 9, 10 bzw. der Komponenten 2, 4 und 8 der Vorrichtung 1 im Raum sind drei Sensoren 11 an der Vorrichtung 1 vorgesehen, die nicht auf einer Geraden angeordnet sind. Die Sensoren 11 sind Ultraschallsender, die mit drei ortsfesten Ultraschallempfängern zusammenarbeiten, um die jeweiligen linearen Abstände zwischen den Sendern und den Empfängern durch Messung der Laufzeit von Ultraschallsignalen zu bestimmen. Aus den linearen Abständen ist die Raumlage der Vorrichtung 1 vollständig bestimmbar.

Fig. 3 zeigt die Lichtschnittoptik 4 der Vorrichtung 1 gemäß den Fig. 1 und 2 in vergrößerter Darstellung mit der Blickrichtung gemäß Fig. 1. Der Laserstrahl 3 trifft auf einen Kegel 12 auf, dessen Kegelmanteloberfläche 15 außen verspiegelt ist. Der Kegel 12 weist einen Öffnungswinkel 13 von 90° auf. Die Kegelachse 14 des Kegels 12 verläuft parallel zu dem einfallenden Laserstrahl 3. So reflektiert die verspiegelte Kegelmanteloberfläche 15 den Laserstrahl 3 senkrecht zu seiner Einfallrichtung in den Lichtschnitt 5, wobei sie ihn gleichzeitig in einer Richtung, die hier senkrecht zur Zeichenebene verläuft, aufweitet. Der Öffnungswinkel der Ränder des Lichtschnitts 5 senkrecht zur Zeichenebene gemäß Fig. 3 hängt dabei davon ab, welchen Abstand der Auftreffpunkt des einfallenden Laserstrahls 3 seitlich zu der Kegelachse 14 aufweist. Je näher der Laserstrahl 3 der Kegelachse 14 und damit der Kegelspitze kommt, desto größer ist der Öffnungswinkel des Lichtschnitts 5. Wenn sich der Laserstrahl 3 von der Kegelachse 14 entfernt, wird der Öffnungswinkel kleiner. Um den jeweils gewünschten Öffnungswinkel des Lichtschnitts 5 einzustellen, ist eine Verschiebeeinrichtung 16 für ein Verschieben des Kegels 12 in Richtung des Doppelpfeils 17 vorgesehen. Wenn dabei dafür Sorge getragen wird, daß bei der Verschiebung die Parallelität des Laserstrahls 3 und der Kegelachse 14 exakt erhalten bleibt, ist keine grundsätzliche Neukalibrierung der Vorrichtung 1 erforderlich. Allerdings verschiebt sich der Lichtschnitt 5 von dem Hauptbalken 9 weg bzw. auf diesen zu. Dies kann jedoch durch eine korrelierte Verschiebung des Kegels 12 um denselben Weg in Richtung seiner Kegelachse kompensiert werden, so daß sich der Auftreffpunkt des Laserstrahls 3 exakt eine (gerade) Mantellinie der Kegelmanteloberfläche entlang bewegt. Justierschrauben 18 sind für die Grundausrichtung des Kegels 12 und damit für die Grundausrichtung des Lichtschnitts 5 parallel zu dem Hauptbalken 9 vorgesehen.

Fig. 4 zeigt eine Weiterentwicklung der Vorrichtung 1 gemäß den Fig. 1 und 2, wobei hier zwei Kameras 8 vorgesehen sind, die in spiegelsymmetrischer Anordnung zu einer Symmetrieebene 19 unter einem Winkel 20 ungleich 90° zu dem Lichtschnitt 5 ausgerichtet sind. Dieser Aufbau kann zur Durchführung von StereoPIV-Messungen verwendet werden. Wie der Zeichnung gemäß Fig. 4 zu entnehmen ist, erfüllen die Kameras 8 durch einen leichten Winkel zwischen ihren Objektiven und ihren Bildsensoren das sogenannte Scheinpflug-Kriterium, wie es aus dem Stand der Technik für die Ausrichtung der Kameras für Stereo-PIV-Messungen bekannt ist.

Auch Fig. 5 zeigt eine Anordnung zur Durchführung von Stereo-PIV-Messungen mit zwei Kameras 8, die zusammen mit der Lichtquelle 2 auf dem Hauptbalken 9 angeordnet sind. Hier ist jedoch kein Querbalken 10 vorgesehen. Vielmehr ist die Lichtschnittoptik 4 direkt am Ausgang der Lichtquelle 2 angeordnet, und der Lichtschnitt 4 verläuft senkrecht von dem Hauptbalken 9 weg und zwar um die Symmetrieebene 19 zwischen den beiden Kameras 8. Diese Anordnung ist besonders stabil und kompakt. Der relevante Bereich des Lichtschnitts 5 befindet sich jedoch auch relativ nahe an den noch größten Bauteilen der Vorrichtung 1, so daß gegenüber den bisherigen Ausführungsformen in verstärktem Maße die Gefahr einer Störung der zu beobachtenden Strömung besteht. Auch bei der Vorrichtung 1 gemäß Fig. 5 können Sensoren 11 zur Positionsbestimmung des hier nur aus dem Hauptbalken 9 bestehenden Trägers mit den Komponenten 2, 4 und 8 der Vorrichtung 1 vorgesehen sein.

Fig. 6 zeigt die Vorrichtung 1 gemäß Fig. 5 in der Seitenansicht, aus der die trichterförmige Öffnung des Lichtschnitts 5 mit dem Öffnungswinkel 21 hervorgeht.

#### BEZUGSZEICHENLISTE

- 1 PIV-Vorrichtung
- 2 Lichtquelle
- 3 Laserstrahl

4 Lichtschnittoptik	
5 Lichtschnitt	
6 Pfeil	
7 Pfeil	
8 Kamera	5
9 Hauptbalken	
10 Querbalken	
9, 10 Träger	
11 Sensor	
12 Kegel	10
13 Öffnungswinkel	
14 Kegelachse	
15 Kegelmanteloberfläche	
16 Verschiebeeinrichtung	
17 Doppelpfeil	15
18 Justierschraube	
19 Symmetrieebene	
20 Blickwinkel	
21 Öffnungswinkel	20

#### Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Durchführung von Particle-Image-Velocimetry-(PIV)-Messungen, mit einer Lichtquelle, mit einer der Lichtquelle nachgeschalteten Lichtschnittoptik zur Ausleuchtung eines Lichtschnitts mit von der Lichtquelle kommendem Licht und mit mindestens einer Kamera zur mehrfachen Abbildung hintereinander von sich in dem Lichtschnitt bewegendem Teilchen, **dadurch gekennzeichnet**, daß ein positionsveränderbarer Träger (9, 10) vorgesehen ist, an dem die Lichtquelle (2), die Lichtschnittoptik (4) und jede Kamera (8) in definierter Relativanordnung gelagert sind, wobei die Relativanordnung bei Positionsveränderungen des Trägers (9, 10) erhalten bleibt.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß eine Positionsmeßeinrichtung vorgesehen ist, um die jeweilige Position des Trägers (9, 10) gegenüber einem ortsfesten Bezugssystem zu messen.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Träger (9, 10) verschiebbar und verschwenkbar ist.
4. Vorrichtung nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Träger (9, 10) einen Hauptbalken (9) aufweist, an dem die Lichtquelle (2) und jede Kamera (8) gelagert ist.
5. Vorrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Träger (9, 10) einen senkrecht an den Hauptbalken (9) angesetzten Querbalken (10) aufweist, an dessen freien Ende das ausgangsseitige Bauteil der Lichtschnittoptik (4) angeordnet ist.
6. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß das ausgangsseitige Bauteil der Lichtschnittoptik (4) mit einer aerodynamisch wirksamen Verkleidung versehen ist.
7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß das ausgangsseitige Bauteil der Lichtschnittoptik (4) eine verspiegelte Kegelmanteloberfläche (15) aufweist.
8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Kegelmanteloberfläche (15) einen Öffnungswinkel von 90° aufweist.
9. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Kegelmanteloberfläche (15) in Richtung einer ihrer Mantellinien gegenüber dem Träger (9, 10) parallelverschieblich ist.
10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß zwei Kameras (8) vorgesehen

hen sind, die die sich in dem Lichtschnitt (5) bewegendem Teilchen aus unterschiedlichen Blickrichtungen abbilden, wobei die Blickrichtungen jeweils einen gleichgroßen Blickwinkel (20) zur Haupterstreckungsebene des Lichtschnitts (5) aufweisen.

---

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -

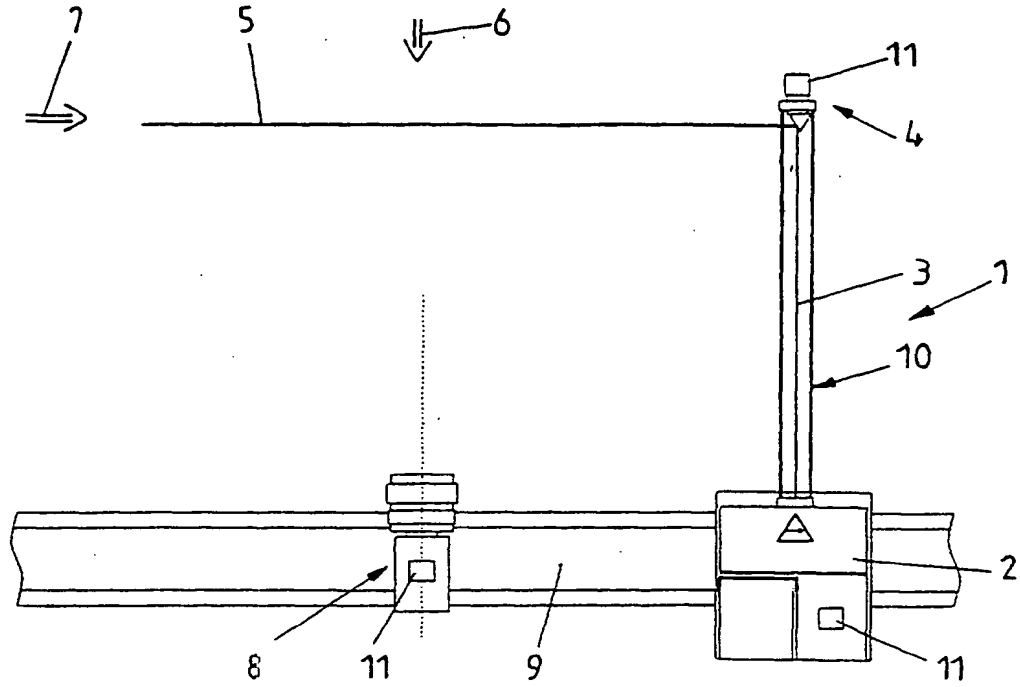


Fig. 1

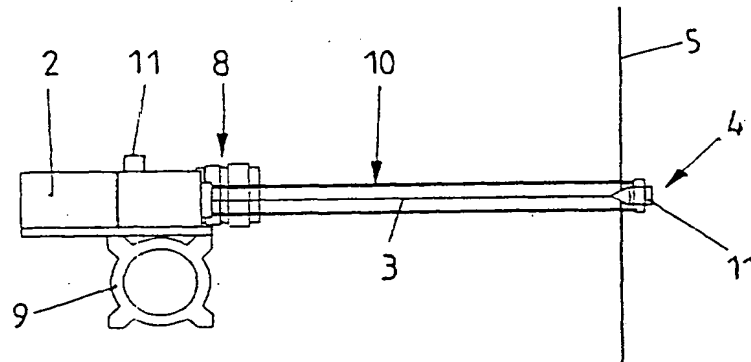


Fig. 2

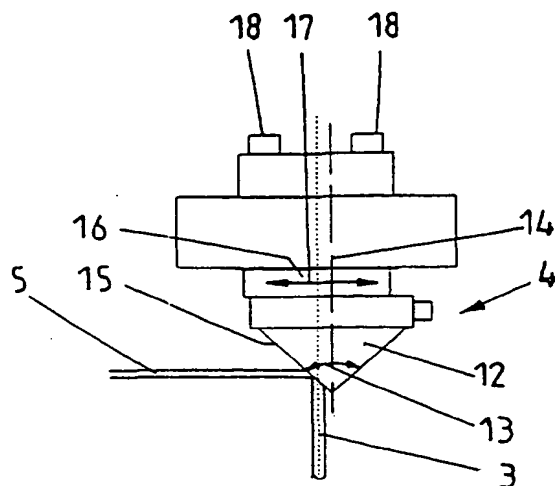


Fig. 3

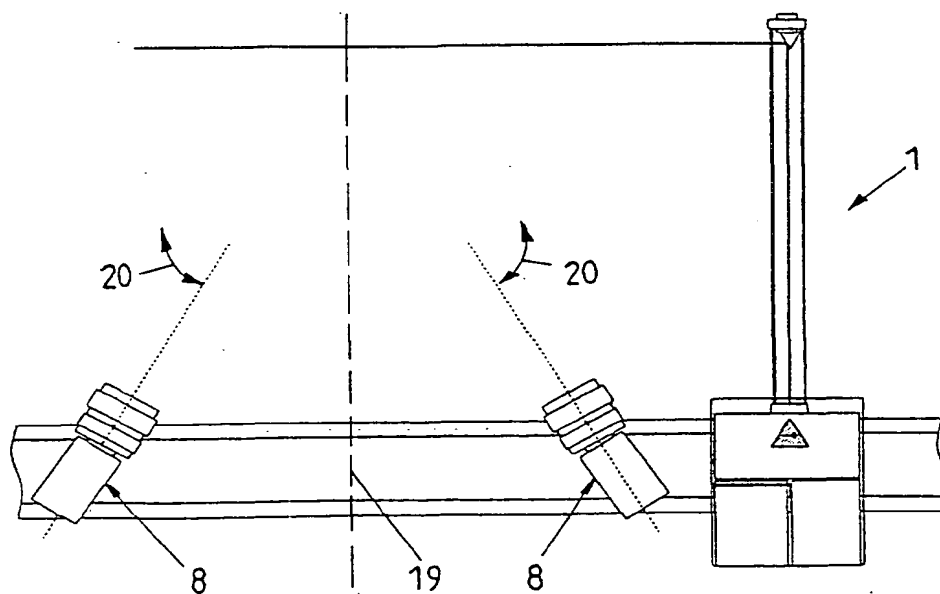


Fig. 4



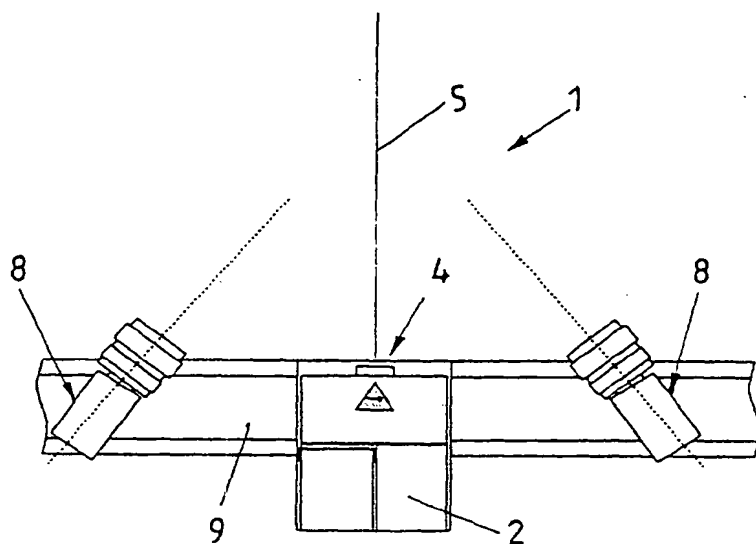


Fig. 5

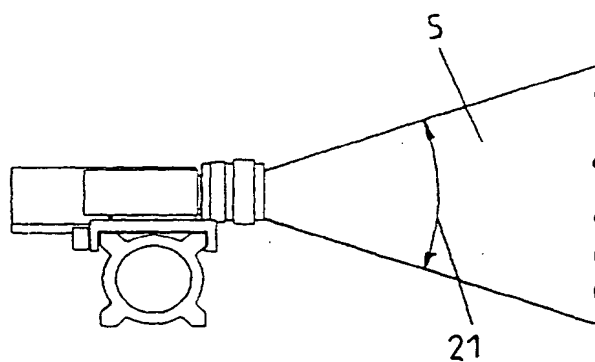


Fig. 6